

DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN PLAN DE MEJORAMIENTO BASADO EN
RCM PARA EL MANTENIMIENTO DE LAS BOMBAS HORIZONTALES DE
INYECCION DE AGUA DE CAMPO JAGUAR – MASA STORK

DIEGO ERNESTO CEPEDA PEREZ
54069209

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SECCIONAL DUITAMA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
2017

DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN PLAN DE MEJORAMIENTO BASADO EN
RCM PARA EL MANTENIMIENTO DE LAS BOMBAS HORIZONTALES DE
INYECCION DE AGUA DE CAMPO JAGUAR – MASA STORK

DIEGO ERNESTO CEPEDA PEREZ
54069209

Proyecto presentado como requisito para optar
Al título de INGENIERO ELECTROMECAÁNICO

Proyecto realizado bajo la modalidad de
MONOGRAFIA

Director:
LUIS ALFONSO JIMENEZ RODRIGUEZ
Ing. Mecánico

Coordinador:
NORY BERMEO
Ing. Mecánico
Esp. Gerencia de Mantenimiento

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SECCIONAL DUITAMA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
2017

Nota de aceptación: _____

Firma del Director de Proyecto _____

Firma del Jurado _____

Firma del Jurado _____

Duitama, 23 de Febrero de 2017

AGRADECIMIENTOS

Se expresan formalmente los agradecimientos:

Sin duda alguna a Dios por sembrar en cada uno de nosotros un tipo de semilla que crece de manera única y junto con la fe y la voluntad de Él, hoy da los primeros frutos, ser profesional en ingeniería electromecánica.

A mis padres que día a día forjaron en mí un hombre de valores y con metas en la vida, pese a todo, y con su sacrificio me ayudaron a salir adelante.

A mi esposa por apoyarme incondicionalmente en todos los momentos y ser esa voz de aliento cuando más lo necesite.

Al Ing. ALFONSO JIMÉNEZ por guiarme paso a paso con una metodología acertada y basada en su experiencia como docente y profesional.

Al Ing. NORRY BERMEO por guiarme dentro del proceso en la empresa masa stork, brindándome información y apoyo en todo momento.

A mis compañeros de aventura universitaria, con quienes compartimos este ciclo de vida en buenos y malos momentos durante la carrera.

Agradezco la empresa Masa Stork, por permitirnos realizar la monografía y formar parte importante de su personal en la consecución de los objetivos de la empresa y a la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia por ser la institución galante de nuestra formación profesional.

A todos gracias por ser y por estar.

Diego Ernesto Cepeda

TABLA DE CONTENIDO

1. TITULO	10
2. GENERALIDADES DE LA EMPRESA MASA STORK	11
2.1 MECÁNICOS ASOCIADOS S.A.S. (MASA STORK)	11
2.2 UBICACIÓN	11
2.3 MISIÓN.	12
2.4 VISIÓN.	12
2.5 CERTIFICACIONES.....	12
3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	13
3.1 ANTECEDENTES	14
3.2 JUSTIFICACIÓN	16
4. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE INYECCIÓN DE AGUA INDUSTRIAL Y APLICACIÓN DE LAS BOMBAS HORIZONTALES.	17
4.1 INTRODUCCION	17
4.2 DESCRIPCION DEL PROCESO DE INYECCIÓN DE AGUA.....	17
4.2.1 FACILIDADES DE SUPERFICIE.....	19
4.3 TIPOS DE INYECCION DE AGUA.....	20
4.3.1 INYECCION PERIFERICA O EXTERNA (VER FIGURA 5).....	20
4.3.2 INYECCION EN ARREGLOS O DISPERSA	23
4.4 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE INYECCIÓN DE AGUA EN CAMPO JAGUAR	25
4.5 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE INYECCIÓN DE AGUA CAMPO JAGUAR.	26
5. DESCRIPCIÓN DE LAS BOMBAS HORIZONTALES MULTIETAPA.....	27
5.1 OPERACIÓN SISTEMA DE BOMBEO HORIZONTAL	28
5.2 INFORMACIÓN TÉCNICA BOMBAS CENTRILIFT. (VER FIGURA 10) ..	29
5.2.1 ESQUEMA GENERAL HPS (VER FIGURA 10)	30
5.2.2 PATIN (VER FIGURA 12).....	30

5.2.3	MOTOR	31
5.2.4	CAMARA DE EMPUJE HORIZONTAL (HTC)	32
5.2.5	SELLO MECÁNICO PARA FLUIDO	34
5.2.6	ADMISION (INTAKE)	35
5.2.7	BOMBA.....	36
5.2.8	DESCARGA (VER FIGURA 23)	38
5.2.9	INSTRUMENTACION	38
5.3	PROCEDIMIENTO DE ARRANQUE	39
5.4	OPERACIÓN DE BOMBA	40
5.4.1	SUMINISTRO DE FLUIDO	40
5.4.2	PURGA.....	40
5.4.3	VALVULAS DE DESCARGA	40
5.4.4	PRECAUCIONES DURANTE LA OPERACIÓN	40
5.5	OPERACIÓN CAMARA DE EMPUJE HTC.....	41
5.6	OPERACION ACOPLE DEL MOTOR	42
5.7	OPERACIÓN MOTOR ELECTRICO	43
5.8	OPERACIÓN MOTOR DE COMBUSTIÓN	43
5.9	OPERACIÓN CAJA INCREMENTADORA DE VELOCIDAD	43
5.10	OPERACIÓN PANEL DE CONTROL DEL MOTOR	43
5.11	CHEQUEO DE OPERACIÓN.....	44
5.12	PROCEDIMIENTOS DE APAGADO	44
5.13	REPUESTOS PARA SISTEMAS HORIZONTALES.....	45
6.	PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN CONFIABILIDAD (RCM)	46
6.1	DEFINICION.....	46
6.2	EL CONTEXTO OPERACIONAL	47
6.3	FUNCIONES	48
6.4	FALLAS FUNCIONALES O ESTADOS DE FALLA.....	48
6.5	MODOS DE FALLA.....	48
6.6	LOS EFECTOS DE FALLA	49

6.7	CATEGORÍA DE CONSECUENCIAS	49
6.8	DIFERENCIA ENTRE EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE FALLA	50
6.9	DIFERENCIA ENTRE FALLA FUNCIONAL Y MODOS DE FALLA	50
6.10	FALLAS OCULTAS	51
6.11	DISTINTOS TIPOS DE MANTENIMIENTO.....	51
6.12	EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO O A CONDICION	52
6.13	EL MANTENIMIENTO PREVENTIVO (SUSTITUCIÓN O REACONDICIONAMIENTO CÍCLICO)	52
6.14	EL MANTENIMIENTO CORRECTIVO O TRABAJO A LA ROTURA	53
6.15	EL MANTENIMIENTO DETECTIVO O DE BÚSQUEDA DE FALLAS	53
6.16	¿CÓMO SELECCIONAR EL TIPO DE MANTENIMIENTO ADECUADO? 54	
6.17	FRECUENCIA DE TAREAS A CONDICIÓN (MANTENIMIENTO PREDICTIVO).....	55
6.18	FRECUENCIA DE TAREAS DE SUSTITUCIÓN CÍCLICA (MANTENIMIENTO PREVENTIVO)	55
6.19	FRECUENCIA DE TAREAS DETECTIVAS (BÚSQUEDA DE FALLAS)..	55
6.20	BENEFICIOS DEL RCM	56
7.	PLAN DE MEJORAMIENTO BASADO EN RCM PARA EL MANTENIMIENTO DE LAS BOMBAS HORIZONTALES DE INYECCION DE AGUA.....	57
8.	CONCLUSIONES	58
9.	RECOMENDACIONES.....	59
10.	BIBLIOGRAFIA.....	60

LISTA DE FIGURAS.

FIGURA 1. DESCRIPCIÓN DE INYECCIÓN DE AGUA INDUSTRIAL MEDIANTE BOMBAS	
HORIZONTALES.	15
FIGURA 2. INYECCIÓN DE AGUA.	18
FIGURA 3. SISTEMA DE INYECCIÓN DE AGUA.	19
FIGURA 4. ESQUEMA DE DESPLAZAMIENTO DE PETRÓLEO POR INYECCIÓN DE AGUA.....	20
FIGURA 5. INYECCIÓN DE AGUA EXTERNA O PERIFÉRICA	22
FIGURA 6. INYECCIÓN DE AGUA EN UN ARREGLO DE 5 POZOS.....	23
FIGURA 7. PANORÁMICA GENERAL PLANTA DE INYECCIÓN DE AGUA JAGUAR	25
FIGURA 8. CLASIFICACIÓN SISTEMAS DE BOMBEO	27
FIGURA 9. ESPECIFICACIONES HPUMPS.....	28
FIGURA 10. PLANO SISTEMA HPUMP	29
FIGURA 11. BOMBA CENTRILIF	30
FIGURA 12. PATÍN.....	30
FIGURA 13. ACOUPLE MOTOR	31
FIGURA 14. ESPACIADOR	32
FIGURA 15. MODELO XE Y XT	33
FIGURA 16. MODELO 3.X	33
FIGURA 17. MODELO 875.....	34
FIGURA 18. SELLO ESTANDAR	35
FIGURA 19. SELLO CARTUCHO	35
FIGURA 20. ADMISION.....	36
FIGURA 21. CARCAZA	37
FIGURA 22. DIFUSORES ATORNILLADOS	37
FIGURA 23. DESCARGA	38
FIGURA 24. PLANO SISTEMA DE LUBRICACIÓN DE CÁMARA DE EMPUJE	41
FIGURA 25. PLAN DE SELLADO HPUMP	42
FIGURA 26. LISTADO DE REPUESTOS BÁSICO.....	45

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A: PLAN DE MEJORAMIENTO BASADO EN RCM PARA EL MANTENIMIENTO DE LAS BOMBAS HORIZONTALES DE INYECCION DE AGUA.

RESUMEN

En el siglo donde la industrialización de las empresas y los grandes sistemas de producción avanzan de manera exponencial se producen todo tipo de inconvenientes técnicos que producen pérdidas económicas importantes, por lo tanto, la realización de una serie de tareas o acciones tendientes a garantizar un funcionamiento eficiente de las máquinas o activos constante en el tiempo, ha llevado a generar un término profesional llamado Mantenimiento.

El presente trabajo despliega el diseño e implementación de un plan de mantenimiento basado en rcm para bombas horizontales multietapa, generando una confiabilidad enfocada al equipo más crítico del proceso de inyección de agua de la empresa Masa – Stork , actual operadora del mantenimiento de la locación campo jaguar.

El reciente diseño elaborado, está encaminado a mantener unos parámetros de sostenibilidad denominados mantenibilidad y disponibilidad de activos del área de inyección de agua, en este caso las bombas de inyección, mejorando el sistema de obtención de crudo y mejorando las políticas de calidad de la empresa.

En el desarrollo del proyecto se realizó la recopilación de información pertinente al proceso de inyección de agua de campo jaguar verificando la criticidad de los equipos presentes en el proceso y analizando los factores más importantes del mismo ya que solo se realizaba mantenimiento correctivo, dado esto, se determinaron las fases o procesos críticos, encontrando que en las bombas horizontales multietapa se presentaban las paradas más críticas y económicamente más costosas. Por consiguiente nuestro diseño e implementación está enfocado a este activo.

En Masa Stork se inició el proceso de implementación del software Administrativo Sap, de donde se recopilaron algunos datos referentes a los tipos de falla y su cuantía en un tiempo determinado, basado en esto se realizaron algunas pruebas específicas a un solo equipo (Bomba de Inyección Horizontales Multietapa) debido a la baja inversión y a que existen 6 bombas de la marca Baker Hugues en su línea Centrilit, se determinó hacer las pruebas en la bomba más usada de estas.

Finalmente basados en estos datos, en las pruebas realizadas, con el apoyo del personal de mantenimiento de masa stork se configuro un Amef general para todos los equipos de inyección y se crearon los formatos y sugerencias de mantenimiento enfocadas a la confiabilidad y mantenibilidad de las bombas de inyección multietapa basados en la normatividad vigente.

Cabe mencionar que la implementación se ira realizando periódicamente, ya que es un proceso que requiere una inversión económica importante en compra de repuestos y en capacitación para el personal, por lo tanto se ira incluyendo en el sistema Sap para permitir medir su eficiencia y final aplicación.

INTRODUCCION

A lo largo de estas décadas se han venido presentando inconvenientes de tipo mecánico en la industria, para este caso en la industria petrolera, en este documento se presentara en específico el estudio de una adecuada aplicación de metodología RCM para los sistemas de inyección de agua de campo jaguar, durante el desarrollo de esta monografía identificaremos los principales problemas de mantenimiento de las bombas de inyección de agua (sistemas de bombeo horizontal (HPS)) y se realizara un análisis detallado acerca de los modos y efectos de falla, debido a que se están presentando varios problemas en estos equipos, teniendo en cuenta su importancia dentro del proceso de inyección de agua se busca evitar paradas inesperadas y excesivo mantenimiento correctivo, de este modo, se sugerirán las mejores metodologías de RCM para lograr una confiabilidad alta en el proceso.

En el presente proyecto se busca realizar un plan de mantenimiento para las bombas horizontales multietapa – Centrillift de Baker Hugues, permitiendo llevar controles y registros para asegurar la eficiencia de los proceso de inyección de agua industrial incluyendo el cuidado del medio ambiente y la seguridad del personal de mantenimiento, todo esto se traduce en un adecuado manejo de datos, herramientas, repuestos, equipos, residuos y personal, entre otros.

Por medio de las herramientas de gestión y administración del mantenimiento y verificando el cumplimiento de objetivos como lo son los diagnósticos iniciales, la generación de indicadores, gestión documental e implementación de estrategias de mantenimiento de vanguardia, junto con una adecuada capacitación e intercambio de experiencias se espera sustentar el presente proyecto dando cumplimiento a la mejora continua que se busca en la empresa masa stork.

De la misma manera el desarrollo de este proyecto y su adecuada aplicación permitirá garantizar con el tiempo la disponibilidad y confiabilidad de las bombas horizontales multietapa de inyección de agua, llevando un mantenimiento estructurado y así cuidando el activo y garantizando la producción estimada para dicho proceso.

La expectativa de esta propuesta es poder aplicar gran parte de los conocimientos adquiridos durante la formación académica en Ingeniería Electromecánica generando un beneficio para MASA STORK y agradeciendo la oportunidad de crecimiento profesional dentro de su gran compañía.

1. TITULO

DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN PLAN DE MEJORAMIENTO BASADO EN
RCM PARA EL MANTENIMIENTO DE LAS BOMBAS HORIZONTALES DE
INYECCION DE AGUA DE CAMPO JAGUAR – MASA STORK

2. GENERALIDADES DE LA EMPRESA MASA STORK¹

2.1 MECÁNICOS ASOCIADOS S.A.S. (MASA STORK)

MASA es una empresa colombiana líder en la prestación de servicios integrales de gestión de activos para el sector petrolero, de minería y energía, constituida hace más de 28 años y que hoy en día hace parte del grupo industrial holandés Stork Technical Services. Con presencia en varios países en Suramérica y un respaldo internacional en tres continentes, acompañar a nuestros clientes a pensar y a hacer una gestión integral de sus activos, de la manera más confiable, segura y productiva es uno de nuestros pilares.

Con una capacidad e recurso humano de más de 4000 colaboradores a lo largo y ancho de Colombia y en Perú, comprometidos con el progreso de cada uno de los países donde estamos presentes, de la región y de nuestros clientes; aplicando en todas las labores los más altos estándares de seguridad, gestión de riesgos y responsabilidad social. MASA, como empresa de Stork Technical Services, está comprometida con el objetivo de ser líder en materia de HSE y mantener altos estándares de seguridad reflejados en la operación con sus clientes.

2.2 UBICACIÓN

Sus oficinas principales se encuentran ubicadas en la Carrera 7 # 74-56 Bogotá - Colombia Tel: (+57) (1) 5951222 y en la Carrera 16 # 20 A 35 Edificio Reindustrias, Neiva - Colombia Tel: (+57) (8) 8712303 email: informacion@masateam.com

¹ <http://www.masateam.com/website/wwwmasa/site/index.php/nuestra-empresa/quienes-somos>

2.3 MISIÓN.

Agregar valor a nuestros clientes ofreciendo soluciones integrales de gestión de activos, comprometidos con el progreso de nuestros colaboradores con los más altos estándares de seguridad, gestión de riesgos y responsabilidad social corporativa.

2.4 VISIÓN.

Ser en el 2016 una organización emprendedora, ágil, con el mejor talento humano y socio estratégico de preferencia de nuestros clientes, alcanzando un crecimiento en ventas del 21% en los sectores industriales intensivos de Latinoamérica y el caribe.

2.5 CERTIFICACIONES

Comprometidos con la sostenibilidad del medio ambiente, la seguridad de nuestros empleados y la calidad de nuestros servicios a través de la excelencia en procesos, MASA soportado en el sistema integral de gestión SIGMA, se encuentra certificado bajo la norma ISO 9001:2008, ISO 14001:2004, OHSAS 18001:2007 y el Registro Uniforme de Evaluación del Sistema de Seguridad, Salud en el Trabajo y Ambiente para Contratistas (RUC).

3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El campo Jaguar es un proyecto de exploración cuya operación inicialmente fue realizada por la compañía Hupecoll, cuyas perspectivas estaban enfocadas a la calidad de crudo extraído ya que contaba con 22 grados API, con una producción inicial de 3000 BPD (Barriles Por Dia) pertenecientes a los pozos JAGUAR 1, 2 y 6.

En el 2008 CEPESA (Compañía Española de Petróleos, S.A.U.) adquiere los derechos de campo Jaguar por la suma de 920 millones de dólares, una vez obtenidas las autorizaciones respectivas de la Agencia Nacional de Hidrocarburos y de Ecopetrol, que ya tiene el 30% del bloque. Cepsa será la empresa operadora del mismo, con una participación del 70%.

El bloque Caracara donde opera la estación JAGUAR tiene una extensión de 47.200 hectáreas aproximadamente y su producción supera actualmente los 20.000 barriles al día, al tiempo que cuenta con unas reservas estimadas de 40 millones de barriles, así como con un significativo potencial de crecimiento a través de nuevas inversiones, tanto en exploración como en desarrollo.

Mecánicos asociados (MASA STORK) inicio como operadora de mantenimiento para CEPESA, implementando estrategias en mantenimiento Predictivo, Preventivo y Correctivo para los equipos de operación de la planta Jaguar, dentro de los cuales se encuentran motores eléctricos de 600 Hp (Horse power), bombas monoblock de 60 Hp, bombas reciprocantes de 600 Hp, compresores, moto generadores y bombas horizontales entre otros.

Al iniciar la operación de las plantas de inyección de agua en campo Jaguar se han encontrado varios inconvenientes referentes al mantenimiento de este tipo de equipos debido a su alto nivel tecnológico y elementos con sellos especiales que actualmente son solamente conocidos por los proveedores o fabricantes. Dichos inconvenientes han llevado a fallas parciales o totales en diferentes elementos de las bombas horizontales, con elevado costo de mantenimiento y tiempos de parada prolongados.

Dentro de las oportunidades de mejora se identifican principalmente algunos problemas en las cámaras de empuje, rodamientos, RTD (Detector de temperatura

resistivo), fallas en la succión y descarga, válvulas motorizadas y protecciones en las bombas horizontales.

Mediante el desarrollo de la monografía, Mecánicos Asociados (MASA STORK) por medio del ingeniero Nory Bermeo, supervisor mecánico y coordinador del proyecto por parte de la empresa permite la aplicación de las estrategias de mantenimiento del proyecto Caracara para las bombas horizontales de la estación Jaguar.

3.1 ANTECEDENTES

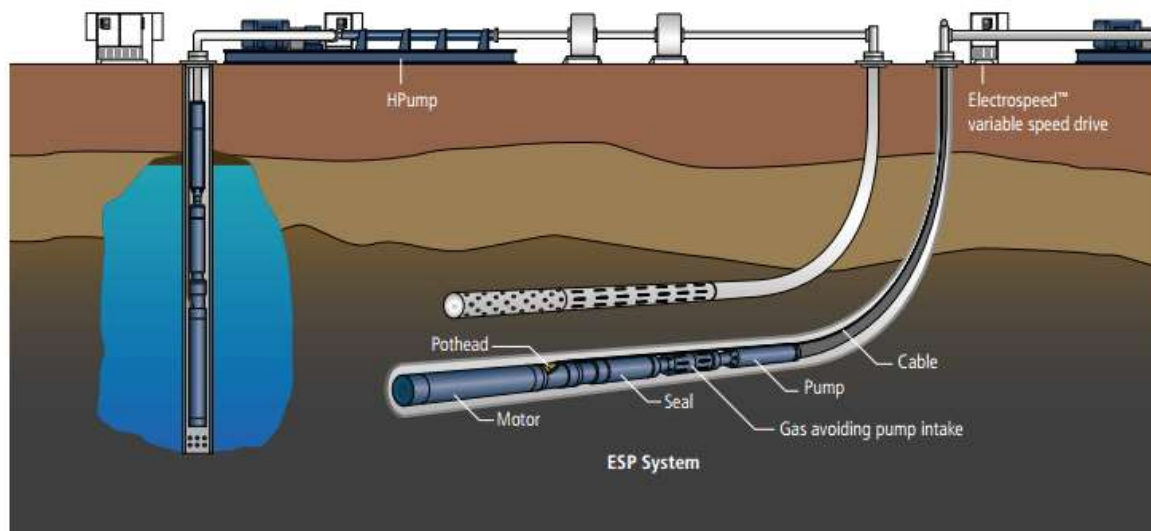
La primera inyección ocurrió accidentalmente en el este de Texas, en el condado de Rusk, por el especulador Columbus Mario Joiner en el pozo Daisy Bradfor 3, cuando el agua, proveniente de algunas arenas acuíferas poco profundas o de acumulaciones de aguas superficiales, se movía a través de las formaciones petrolíferas, entraba en los pozos perforados e incrementaba la producción de petróleo en los pozos vecinos mediante la presión que producía la filtración de aguas. En esa época se pensó que la función principal de la inyección de agua era la de mantener la presión del yacimiento y no fue sino hasta los primeros años de 1980, cuando los operadores notaron que el agua que había entrado a la zona productora había mejorado la producción.²

Para 1907, la práctica de la inyección de agua tuvo un apreciable impacto en la producción de petróleo del Campo Bradford. El primer patrón de flujo, denominado una invasión circular, consistió en inyectar agua en un solo pozo, a medida que aumentaba la zona invadida y que los pozos productores que la rodeaban eran invadidos con agua, estos se iban convirtiendo en inyectores para crear un frente circular más amplio. Este método se expandió lentamente en otras provincias productoras de petróleo debido a varios factores, especialmente a que se entendía muy poco y a que muchos operadores estuvieron en contra de la inyección de agua dentro de la arena. Además, al mismo tiempo que la inyección de agua, se desarrolló la inyección de gas, generándose en algunos yacimientos un proceso competitivo entre ambos métodos.

² Paris de ferrer, Magdalena. "Inyección de agua y gas en yacimientos petrolíferos", cap 2. Maracaibo, Venezuela. editorial Astro Data.

En 1921, la invasión circular se cambió por un arreglo en línea, en el cual dos filas de pozos productores se alternaron en ambos lados con una línea igual de pozos inyectores. Para 1928, el patrón de línea se reemplazó por un arreglo de 5 pozos. Después de 1940, la práctica de la inyección de agua se expandió rápidamente y se permitieron mayores tasas de inyección. En la actualidad, es el principal y más conocido de los métodos de recuperación secundaria, constituyéndose en el proceso que más ha contribuido al recobro del petróleo extra. Hoy en día, más de la mitad de la producción mundial de petróleo se debe a la inyección de agua. Ver figura 1.

Figura 1. Descripción de inyección de agua industrial mediante bombas horizontales.



Fuente: <http://assets.cmp.bh.mxmccloud.com/system/ca/5b0b70e01b11e39266b1072844e32f/HPump.Kit.pdf>

3.2 JUSTIFICACIÓN

El campo JAGUAR se encuentra ubicado en la ciudad en Puerto Gaitán, llano adentro, en uno de los complejos petroleros más grandes del país. Es un campo de recuperación secundaria, el cual se encuentra operado actualmente en convenio por Cepsa como operadora y Mecánicos Asociados (Masa Stork) como operador de mantenimiento.

CEPSA contrata a Masa Stork como operadora de mantenimiento y entre las especificaciones del proyecto solicita se entregue una documentación específica dentro de la cual se encuentre la estrategia de mantenimiento aplicable al proyecto, para poder asegurar que todo lo que se solicita se cumple y además, se pueda asegurar la calidad de los procesos y materiales. Por estas razones Masa Stork diseña la estrategia de mantenimiento basada en RCM y la aplica en el proyecto desde la planeación hasta la entrega. Así, esta empresa garantiza su servicio final y cumple con las metas de mantenimiento.

Durante el desarrollo de este trabajo se pretende afianzar los conocimientos teórico – prácticos del RCM (Reliability Centered Maintenance) o Mantenimiento centrado en Confiabilidad bajo el proceso de aprendizaje aplicado a la optimización del mantenimiento de las bombas horizontales de operación de inyección de agua de campo JAGUAR.

El perfil del ingeniero electromecánico permite al estudiante participar en un proyecto de gran magnitud y que se pueda hacer seguimiento a cada uno de los procesos que en conjunto hacen que se utilice el conocimiento recolectado durante la carrera. Al tener la capacidad de involucrarse en el proyecto de manera activa la empresa asegura que personal idóneo sea quien desarrolle esta documentación y la interprete de manera correcta con el fin de lograr que el proyecto avance y prospere de forma segura y exitosa.

4. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE INYECCIÓN DE AGUA INDUSTRIAL Y APLICACIÓN DE LAS BOMBAS HORIZONTALES.

4.1 INTRODUCCION

Las fuerza primarias que actúan en los yacimientos de petróleo como mecanismos de recolección de petróleo, generalmente se han complementado mediante la inyección de agua y gas como procesos secundarios de recobro con el fin de aumentar la energía y, en consecuencia, aumentar el recobro o recuperación de crudo. Posteriormente se han utilizados otros procesos mejorados de recuperación de petróleo, pero su uso ha estado limitado por la rentabilidad que se requiere para su explotación comercial. Por estas razones, la inyección de agua y gas continúan siendo los métodos más utilizados en la recuperación extra de crudo de los yacimientos.

4.2 DESCRIPCION DEL PROCESO DE INYECCIÓN DE AGUA.

La inyección de agua es el proceso por el cual el petróleo es desplazado hacia los pozos de producción por el empuje del agua. Esta técnica no es usada en campos petroleros que tienen un empuje natural de agua. La primera operación conocida de inyección de agua fue efectuada hace más de 100 años en el área de Pithole City al Oeste de Pennsylvania. Sin embargo, el uso de esta técnica no fue muy usada hasta la década de los cuarenta.

Bajo condiciones favorables, la inyección de agua es un método efectivo para recuperar petróleo adicional de un reservorio. Los factores que son favorables para una alta recuperación por inyección de agua incluye: baja viscosidad del petróleo, permeabilidad uniforme y continuidad del reservorio.

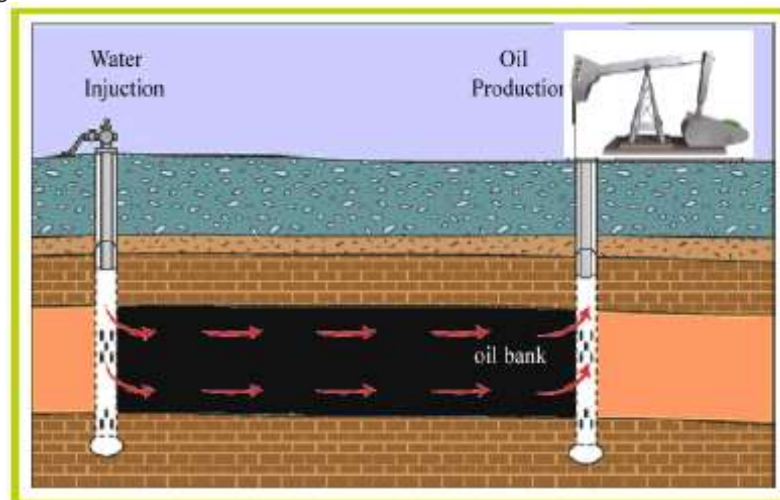
Muchos proyectos de inyección de agua son "patrones de inyección" donde los pozos de inyección y producción son alternados en un patrón regular.

Una de las primeras consideraciones en la planificación de un proyecto de inyección de agua es localizar una fuente accesible de agua para la inyección. El agua salada es usualmente preferida al agua fresca, y en algunos casos se prohíbe desde el punto de vista contractual el uso de agua fresca para la inyección.

Hoy en día, la inyección de agua es el principal y más conocido de los métodos EOR, y hasta la fecha es el proceso que más ha contribuido en la recuperación extra del petróleo. No obstante, se considera que, después de una invasión con agua todavía queda en el yacimiento más del 50% de aceite original *in situ*. El objetivo principal de la inyección de agua es mantener la presión a cierto valor o suplementar la energía natural del pozo. El primer caso se conoce como mantenimiento de la presión y el segundo como mantenimiento parcial. Ambos dan lugar a un incremento en el recobro del petróleo, a una mejora en los métodos de producción y aun aprovechamiento y conservación del agua producida.

Un factor predominante que controla las operaciones de inyección de agua es la localización de los pozos inyectoros con respecto a los pozos productores y los límites del yacimiento. Es aquí donde nace la necesidad de crear una fuente de información compleja y clara de esta importante actividad que lleva a cabo en los campos petroleros de todo el mundo.³ Ver figura 2.

Figura 2. Inyección de agua.



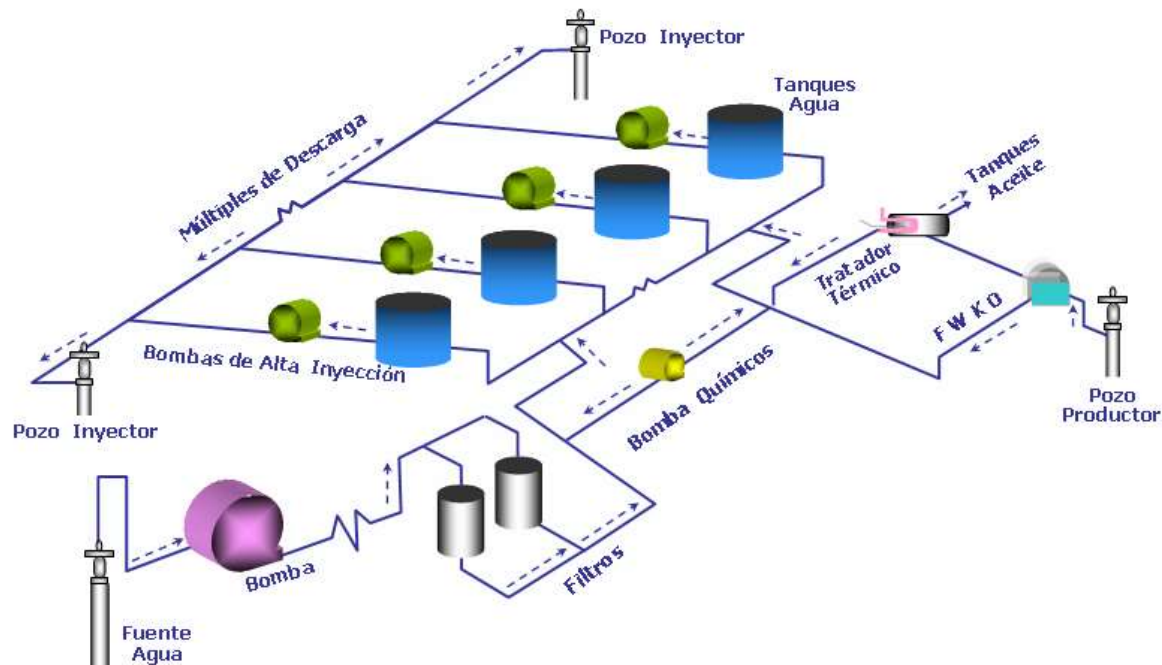
Fuente: Modificado de
<http://images.google.com.co/imgres?imgurl>

³ Guatavita, Omar Camilo, Trujillo, Yeison Alfredo, Generalidades de Inyección de Agua en campos Petrolíferos. Corporación Internacional de Petróleo, Villavicencio, 2012.

4.2.1 FACILIDADES DE SUPERFICIE.

Las operaciones y facilidades de superficie varían considerablemente de un proyecto a otro y sufren cambios durante las etapas del desarrollo de la inyección de agua; los patrones de inyección, la topografía de la superficie, las características del yacimiento, los tipos de pozos (verticales, horizontales o desviados) y las operaciones de campo, entre otros, son el comienzo del diseño y posterior construcción del sistema de facilidades de superficie de un campo. Ver figura 3.

Figura 3. Sistema de inyección de agua.



Fuente: Water Problems in Oil Production. L. C. Case. PennWel. 1970.

En la figura anterior se observa un sistema de inyección de agua generalizado con una configuración múltiple, no se describe el sistema de levantamiento artificial ya que su selección depende de las condiciones de cada proyecto; se presentan los siguientes equipos:

- Separador bifásico y trifásico (Free Water Knock Out - FWKO).
- Tratador térmico y electroestático (Gun Barrel).
- Bombas de alimentación.
- Filtros.

- Múltiple de descarga (Manifold).
- Tanques de almacenamiento de agua.
- Bombas Booster
- Bomba de inyección (HPS).

El sistema de facilidades de superficie es un conjunto de equipos que recoge, distribuye, trata y almacena los fluidos producidos e inyectados; en el caso de la inyección de agua, el corazón del sistema de inyección es la estación de bombeo, la cual es responsable de la tasa de inyección, presión de inyección (en fondo y en cabeza de pozo), presión de descarga en la bomba, capacidad de inyección, entre otros factores.

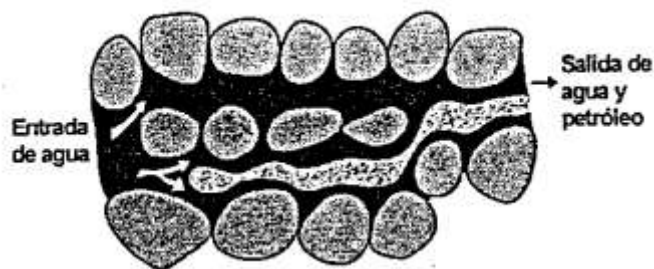
4.3 TIPOS DE INYECCION DE AGUA

De acuerdo con la posición de los pozos inyectoros o productores, la inyección de agua se puede llevar a cabo de dos maneras diferentes:

4.3.1 INYECCION PERIFERICA O EXTERNA (VER FIGURA 5)

Consiste en inyectar agua fuera de la zona de petróleo, en los flancos del yacimiento. Se conoce como inyección tradicional donde el agua se inyecta en el acuífero cerca del contacto agua – petróleo.

Figura 4. Esquema de desplazamiento de petróleo por inyección de agua.



Fuente: Paris de Ferrer, Magdalena. Inyección de agua y gas en yacimientos petroleros, 2001.

Características:

- Se utiliza cuando no se posee una buena descripción del yacimiento o la estructura del mismo favorece la inyección de agua
- Los pozos de inyección se colocan en el acuífero, fuera de la zona de petróleo.

Ventajas:

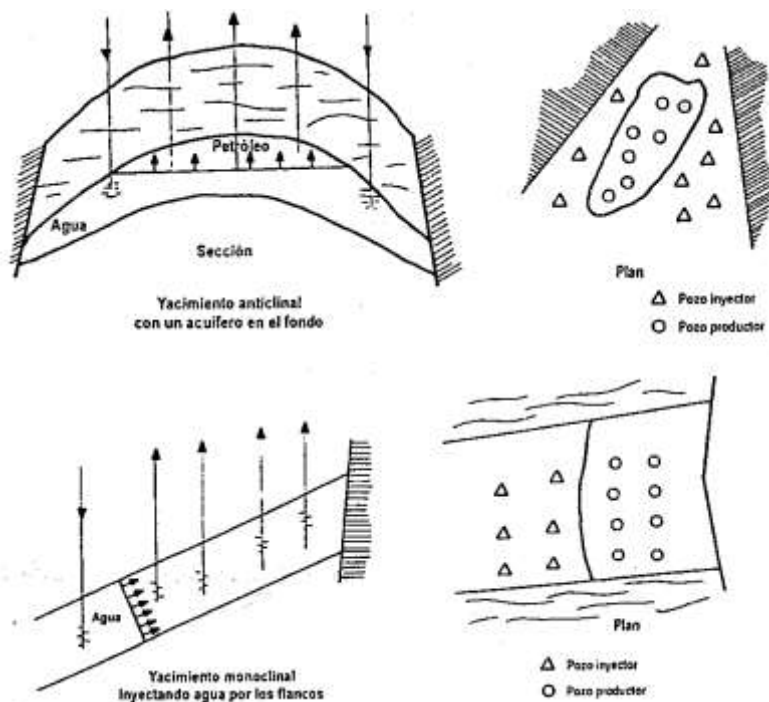
- Se utilizan pocos pozos.
- No requiere perforación de pozos adicionales, ya que se pueden usar pozos productores viejos como inyectores. Esto disminuye la inversión en áreas donde se tienen pozos perforados en forma irregular o donde el espaciamiento de los pozos es muy grande.
- No se requiere buena descripción del yacimiento para iniciar el proceso de invasión con agua.
- Rinde un recobro alto de petróleo con un mínimo de producción de agua. En este tipo de proyecto, la producción de agua puede ser retrasada hasta que el agua llegue a la última fila de pozos productores. Esto disminuye los costos de las instalaciones de producción de superficie para la separación de agua-petróleo.

Desventajas

- Una porción del agua inyectada no se utiliza para desplazar el petróleo.
- No es posible lograr un seguimiento detallado del frente de invasión, como si es posible hacerlo en la inyección de agua de arreglos.

- En algunos yacimientos, no es capaz de mantener la presión de la parte central del mismo y es necesario hacer una inyección en arreglos en esa parte de los yacimientos.
- Puede fallar por no existir una buena comunicación entre la periferia y en centro del yacimiento.
- El proceso de invasión y desplazamiento es lento y, por lo tanto, la recuperación de la inversión es a largo plazo.

Figura 5. Inyección de agua externa o periférica



Fuente: Paris de Ferrer, Magdalena. Inyección de agua y gas en yacimientos petroleros, 2001

4.3.2 INYECCION EN ARREGLOS O DISPERSA

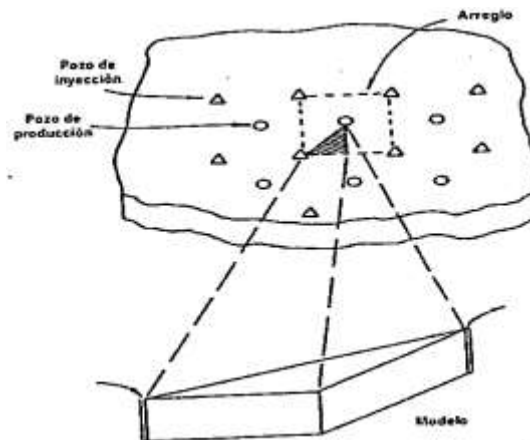
Consiste en inyectar el agua dentro de la zona de petróleo. El agua invade esta zona y desplaza los fluidos (petróleo-gas) del volumen invadido hacia los pozos productores. Este tipo de inyección también se conoce como inyección de agua interna, ya que el fluido se inyecta en la zona de petróleo a través de un numero apreciable de pozos inyectoros que forman un arreglo geométrico con pozos productores.

Características

- La selección del arreglo depende de la estructura y límites del yacimiento, de la continuidad de las arenas, de la permeabilidad y del número y posición de los pozos existentes.
- Se emplea, particularmente, en yacimientos con poco buzamiento y una gran extensión de área.

A fin de obtener un barrido uniforme, los pozos inyectoros se distribuyen entre los pozos productores, para lo cual se convierten los pozos productores existentes en inyectoros, o se perforan pozos inyectoros interespaciados. En ambos casos, el propósito es obtener una distribución uniforme de los pozos, similar a la utilizada en la fase primaria del recobro. (Ver figura 6)

Figura 6. Inyección de agua en un arreglo de 5 pozos.



Fuente: Paris de Ferrer, Magdalena. Inyección de agua y gas en yacimientos petroleros, 2001

Ventajas

- Produce una invasión más rápida en yacimiento homogéneos, de bajos buzamientos y bajas permeabilidades efectivas con alta densidad de pozos, debido a que la distancia inyector – productor es pequeña. Esto es muy importante en yacimientos de baja permeabilidad.
- Rápida respuesta del yacimiento.
- Elevadas eficiencias del barrido real.
- Permite un buen control del frente de invasión y del factor de reemplazo.
- Disminuye el efecto negativo de las heterogeneidades sobre el recobro.
- Rápida respuesta en presiones
- El volumen de la zona de petróleo es grande en un periodo corto.

Desventajas

- En comparación con la inyección externa, este método requiere una mayor inversión, debido al alto número de pozos inyectores.
- Es más riesgosa
- Exige un mayor seguimiento y control y, por lo tanto, mayor cantidad de recursos humanos.

4.4 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE INYECCIÓN DE AGUA EN CAMPO JAGUAR

La planta de inyección de estación Jaguar, tiene una capacidad de filtración e inyección de 240.000 Barriles de agua diarios; el proceso inicia con el recibo del agua de reinyección, que proviene de los pozos JSW246, JSW135 y JSW5H – 7H , la cual es separada del crudo que se recibe de los pozos que llegan a dichas estaciones. El agua es recibida en dos (2) tanques de acero API, posteriormente, esta agua es bombeada por bombas centrífugas Goulds a filtros cascara de nuez a una presión de 50 Psi cuyo medio filtrante es cascara de nuez , una vez el agua ha sido filtrada, es enviada de los filtros a un tanque de agua de producción (tanque de cabeza). De este tanque es bombeada a través de bombas centrífugas booster a mínimo 45 Psi a las bombas multi-etapas centrífugas de inyección, y de estas es bombeada al anillo de inyección, el cual es repartida a los diferentes pozos de inyección, C5, T7, C7, Jaguar 21 y 27. (Ver figura 7)

Figura 7. Panorámica General Planta de Inyección de agua Jaguar



Fuente: Sistema de información LCI – Ecopetrol.

4.5 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE INYECCIÓN DE AGUA CAMPO JAGUAR.

A manera de resumen se hace una breve descripción de la planta, la cual está compuesta por los siguientes equipos principales:

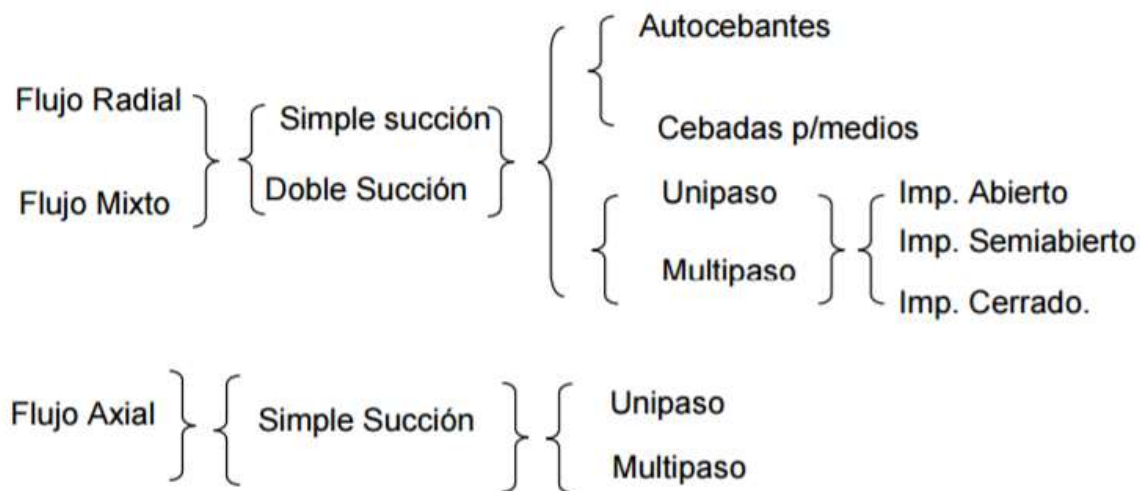
- Dos tanques de acero de 25000 barriles de capacidad volumétrica c/u, de recibo de agua producida.
- Dos tanques de acero de 5000 barriles de capacidad volumétrica para cabeza de bombas booster.
- 1 tren de 4 bombas de filtros de 50 psi de capacidad cada una.
- 1 tren de 2 filtros de cascara de nuez Petreco de 40 MBPD de capacidad cada uno y sus sistemas asociados de decantadores, bombas de agua y de lodos.
- 1 tren de 6 bombas booster.
- 1 tren de bombas de inyección controladas para 2000 psi consistente en 6 bombas Centrífugas de 30 MBPD con arrancador Benshaw.
- Un tren de generadores diésel 750 KW.
- 1 cuarto de control y CCM
- 1 sistema de compresión de aire
- Vías internas y cerramiento

5. DESCRIPCIÓN DE LAS BOMBAS HORIZONTALES MULTITETAPA

Una bomba es un dispositivo para incrementar la presión de un fluido, la presión diferencial entre la descarga de la bomba y un punto corriente abajo (downstream) causa que el fluido se mueva en la dirección de menor presión. Generalmente las bombas utilizadas en los procesos de inyección de agua son de dos tipos: Reciprocantes y Centrífugas

Los diferentes tipos de bombas que existen en la industria, son de características tan variadas que rebasan, con mucho, los alcances del presente documento, por lo que a continuación se presenta su clasificación, considerando únicamente las de mayor utilización, en los sectores de agua industrial y potable, aguas negras y pluviales que son de tipo centrífuga. (Ver figura 8)

Figura 8. Clasificación Sistemas de Bombeo



Fuente: Domínguez, Santiago. Manual de mantenimiento para bombas centrífugas multipasos para suministro de agua en plantas de proceso. 2009

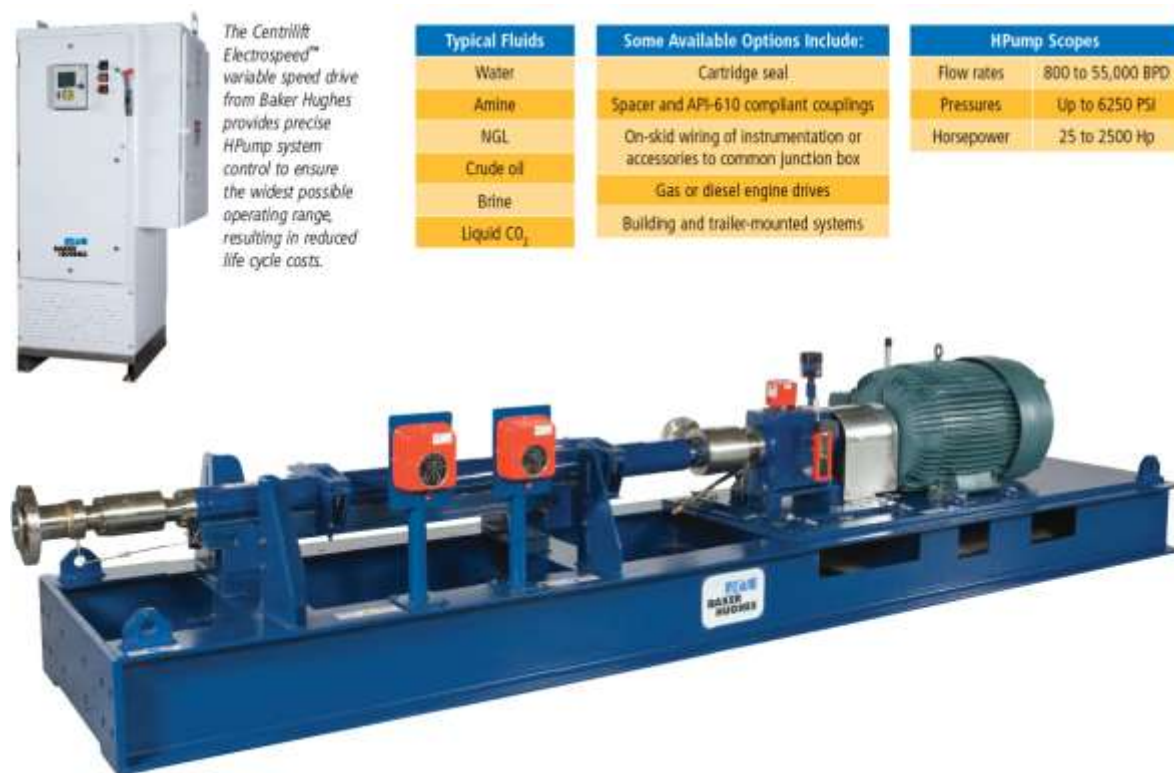
A continuación se muestran los principales parámetros, condiciones y características de operación, funcionamiento y mantenimiento recomendados para los dispositivos Hpump especificados por Centrilif

5.1 OPERACIÓN SISTEMA DE BOMBEO HORIZONTAL

Las bombas centrifugas multi-etapas están diseñadas para operar en un rango específico de presión y caudal. La operación fuera de éste rango puede ocasionar daño en las etapas de la bomba por empuje ascendente o descendente resultando en la reducción del tiempo de vida útil de los equipos. Operar dentro del rango establecido mejora la eficiencia y reduce el consumo de potencia. La presión mínima requerida varía dependiendo de cada modelo de bomba.

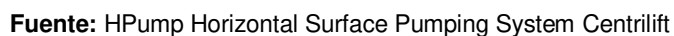
En el campo jaguar específicamente como se describía anteriormente, se utiliza un tren de 6 bombas horizontales multietapa de marca **Baker hugues** en su marca **centrilift**, que recibe una carga de agua a 45 psi de las bombas booster elevando la presión a través de su sistema multietapa para entregar a los pozos de inyección a aproximadamente 2000 psi de presión. (Ver figura 9)

Figura 9. Especificaciones Hpumps



Fuente: HPump Horizontal Surface Pumping System Centrilift

Figura 10. Plano Sistema Hpump



5.2.1 ESQUEMA GENERAL HPS (ver figura 10)

Figura 11. Bomba Centrífuga

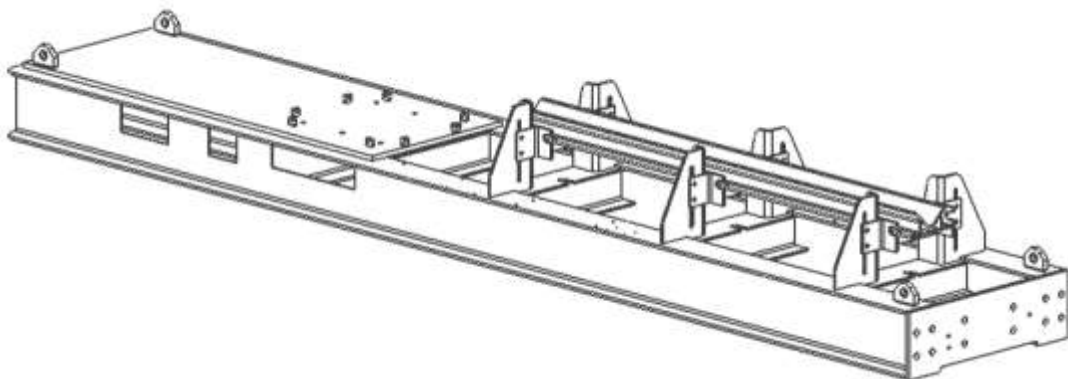


Fuente: HPump Horizontal Surface Pumping System Centrilift

Los principales componentes del sistema son: la bomba centrífuga multi-etapas, cámara de empuje (HTC), admisión y descarga de fluido, instrumentación y motor, todos estos instalados en una estructura de acero denominada patín como se muestra en la figura.

5.2.2 PATIN (ver figura 12)

Figura 12. Patín



Fuente: HPump Horizontal Surface Pumping System Centrilift

El patín es fabricado de acero y provee la plataforma para montar todos los componentes.

El sistema completo es alineado con láser en la fábrica antes de ser embarcado, la rigidez del patín minimiza la desalineación durante el transporte, instalación, y vibración normal durante la operación.

La bomba es soportada por una sección longitudinal atornillada a una cuna en forma de “V” que permite desplazamiento horizontal y vertical para efectos de la alineación. Una serie de grapas aseguran la bomba a la cuna.

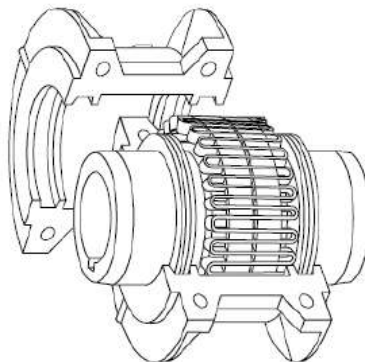
5.2.3 MOTOR

Los sistemas HPump utilizan diferentes tipo de motor bien sea eléctricos o de combustión.

ACOPLE DEL MOTOR

Acople Cerrado (Grid Type) (Ver figura 13)

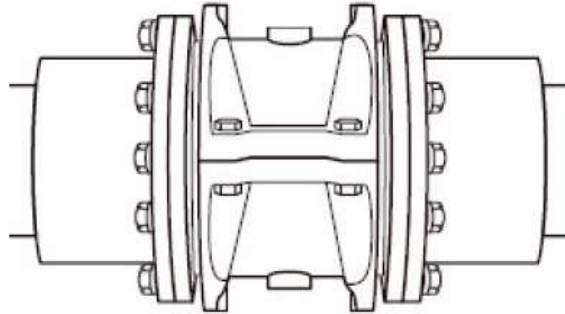
Figura 13. Acople Motor



Fuente: HPump Horizontal Surface Pumping System Centrilift

Espaciador (Grid Type)(Ver figura 14)

Figura 14.Espaciador



Fuente: HPump Horizontal Surface Pumping System Centrilit

Acoples de tipo Grilla son utilizados para conectar la HTC al motor, existen del tipo acople cerrado o espaciador. El acople espaciador permite retirar la HTC sin necesidad de remover las tuberías de alimentación y descarga.

5.2.4 CAMARA DE EMPUJE HORIZONTAL (HTC)

La HTC es un componente lubricado por aceite que tiene 3 propósitos principales:

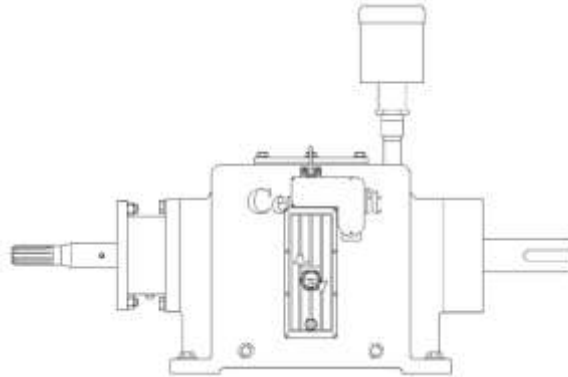
Transmitir el torque del motor a la bomba, absorber las cargas generadas por la bomba y sellar el fluido de bombeo del ambiente.

La HTC utiliza una base modular de montaje que sirve para ser conectada a motores de diferente altura.

Hay disponibles 4 modelos de HTC con diferente capacidad de carga: 1. XE, 1.XT, 3.X, y 875. Cada HTC está compuesta de carcasa, eje, rodamientos, sello del eje y sello mecánico para fluido. Diferentes tipos de instrumentos están disponibles para medir la vibración, el nivel de aceite y temperatura de la HTC.

- **Modelos 1.XE / 1.XT** (Ver figura 15)

Figura 15. Modelo XE y XT



Fuente: HPump Horizontal Surface Pumping System Centrilift

Las HTC modelos 1.XE y 1.XT va montada sobre patas atornilladas al pedestal. El modelo 1.XT utiliza un rodamiento de carga de mayor capacidad y un sistema de enfriamiento de aceite.

- **Modelo 3.X** (Ver figura 16)

Figura 16. Modelo 3.X

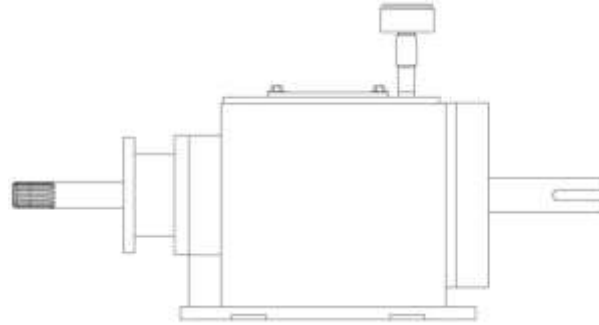


Fuente: HPump Horizontal Surface Pumping System Centrilift

La HTC 3.X va montada sobre un brida. El lado del motor va atornillado a un pedestal vertical. La capacidad de carga de este modelo es superior al de la 1.XT y requiere de un sistema de lubricación y enfriamiento de aceite presurizado.

- **Modelo 875** (Ver figura 17)

Figura 17. Modelo 875



Fuente: HPump Horizontal Surface Pumping System Centrilit

El modelo HTC 875 también va montado sobre patas, y tiene la misma impresión de montaje que las de la serie 1. Este modelo de cámara de empuje posee la misma capacidad de carga que el modelo 3.X y también requiere sistema independiente de lubricación.

- **Modelos 4.X / 5.X**

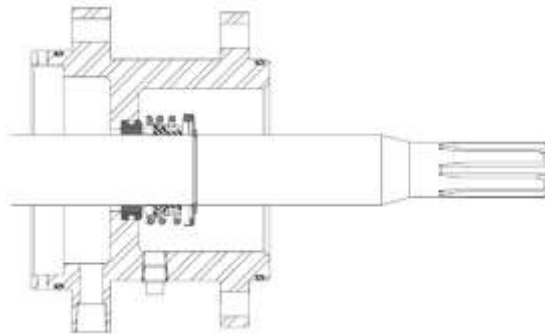
Los modelos 4.X y 5.X son una modificación de los modelos 1 y 3, pero utilizan sellos de cartucho. Ambos modelos poseen un eje más grande para poder instalar el sello de cartucho.

5.2.5 SELLO MECÁNICO PARA FLUIDO

Este sello está diseñado para mantener el fluido a ser bombeado aislado del medio ambiente. Normalmente este sello es instalado en la cabeza de la HTC o en la cámara para sello. Gran variedad de sellos y sistemas de lavado de sellos están disponibles en el mercado para diferentes aplicaciones. Las propiedades del fluido y condiciones de operación son las que indican que tipo de sello se debe utilizar.

- **Sello Estándar Tipo 2** (Ver figura 18)

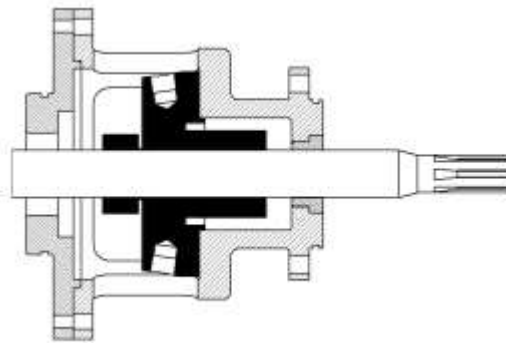
Figura 18. Sello Estandar



Fuente: HPump Horizontal Surface Pumping System Centrilit

- **Sello de Cartucho (Negro)**

Figura 19. Sello Cartucho



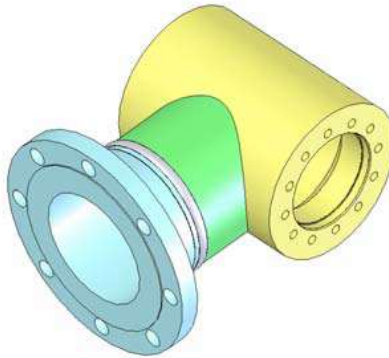
Fuente: HPump Horizontal Surface Pumping System Centrilit

5.2.6 ADMISION (INTAKE)

El ensamble soldado de admisión va atornillado a la bomba y a la HTC. Su función principal es permitir la entrada de fluido a la bomba. Admisiones de diferentes tamaños y tipos de brida están disponibles para diversas aplicaciones de bombeo.

La dirección de la admisión puede ser cambiada en el campo (incrementos de 90°) de acuerdo al arreglo disponible de las tuberías. (Ver figura 20)

Figura 20. Admisión



Fuente: HPump Horizontal Surface Pumping System Centrilift

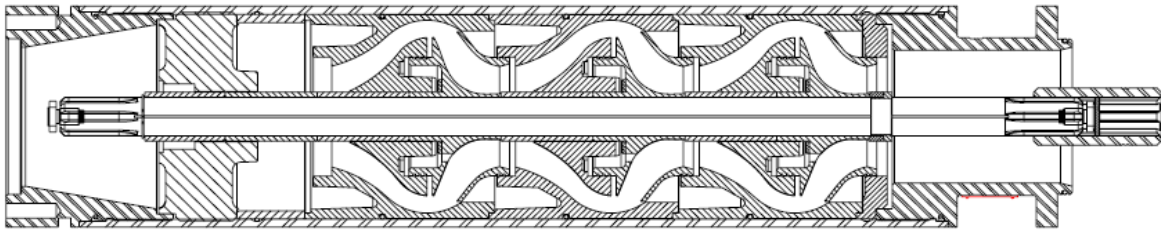
5.2.7 BOMBA

Es una bomba centrífuga multi-etapas, instalada horizontalmente. Tiene varios difusores estacionarios y el mismo número de impulsores giratorios. La cabeza de la bomba va atornillada a la descarga y la base atornillada a la admisión. Hay 2 tipos de bomba disponibles dependiendo de los requerimientos de caudal y presión:

- De carcaza. (Ver figura 21)
- Difusores atornillados. (Ver figura 22)

- **Housed (Carcaza)**

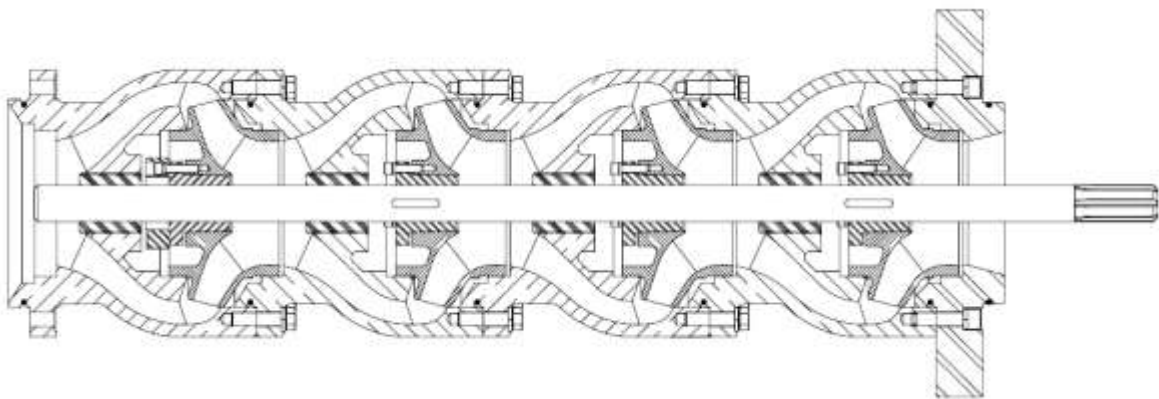
Figura 21. Carcaza



Fuente: HPump Horizontal Surface Pumping System Centrilift

- **Bolted Bowl (Difusores Atornillados)**

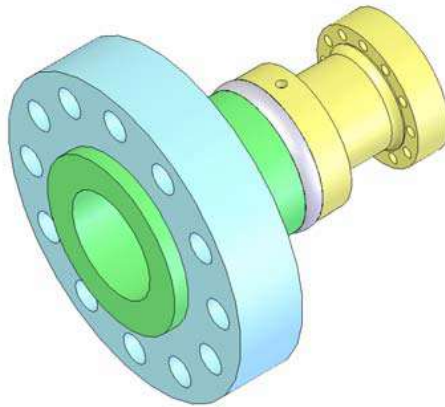
Figura 22. Difusores Atornillados



Fuente: HPump Horizontal Surface Pumping System Centrilift

5.2.8 DESCARGA (Ver figura 23)

Figura 23. Descarga



Fuente: HPump Horizontal Surface Pumping System Centrilift

El ensamble soldado de descarga va atornillado a la cabeza de la bomba, lleva el fluido de alta presión de la bomba a la línea de flujo. Hay disponibilidad de diferentes tamaños y tipos de brida de acuerdo a los requerimientos de la línea de flujo. La descarga posee una brida rotatoria que facilita los trabajos de conexión.

5.2.9 INSTRUMENTACION

Las variables así como la instrumentación estándar de los sistemas HPump son las siguientes:

- Vibración de la HTC
- Nivel de aceite de la HTC
- Presión de entrada y descarga de la bomba.

Estas están disponibles en los instrumentos para medir la temperatura del aceite de la HTC y embobinado del motor. Los instrumentos de medición pueden ser

cableados a un controlador de velocidad variable (VSD) Centrilito o cualquier sistema de control utilizado por el cliente.⁴

5.3 PROCEDIMIENTO DE ARRANQUE

Hay varios aspectos que deben ser revisados antes del arranque inicial del equipo y cada vez que el mismo ha estado fuera de servicio por un periodo de tiempo considerable.

- Verificar que la bomba esté girando en el sentido correcto haciendo un arranque del motor.
- Verificar el nivel de aceite de la HTC en el visor o manómetro.
- Si el equipo está provisto de un sistema de refrigeración para la HTC, arrancar el sistema y purgarlo antes de arrancar la unidad de bombeo.
- Revisar todos los tornillos, cableado y líneas de flujo.
- Revisar todos los manómetros, válvulas, y todos los instrumentos para verificar su correcta posición u operación, verifique el punto de ajuste de todos los instrumentos en el arrancador.
- Asegurarse de tener la válvula de la línea de flujo de la admisión completamente abierta.
- Asegurarse que la válvula de la descarga esté por lo menos un 25% abierta; puede ser necesario hacer contra-presión ajustando la válvula para mantener la bomba dentro de su rango de operación mientras que el sistema se estabiliza.
- Asegurarse que la unidad esté nivelada y no haya vibración excesiva.
- Si está operando con un variador de frecuencia, arrancar a baja velocidad para revisar a baja presión que no haya fugas.

⁴ HPump Horizontal Surface Pumping System Centrilito Manual

5.4 OPERACIÓN DE BOMBA

A continuación se describen los principales parámetros de operación de la bomba horizontal multietapa.

5.4.1 SUMINISTRO DE FLUIDO

Asegúrese que las válvulas de la línea de flujo estén abiertas, y que haya fluido en la línea. Si está utilizando una bomba para aumentar la presión (booster), ésta debe estar operativa, si hay filtros instalados en el sistema estos deben estar limpios.

5.4.2 PURGA

Retire todo el aire que haya en el área de admisión (Línea, admisión y bomba), asegúrese que la bomba esté llena de fluido (cebada) antes de dar arranque al equipo.

5.4.3 VALVULAS DE DESCARGA

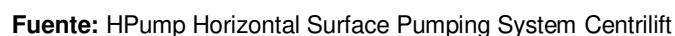
Asegúrese que todas las válvulas estén ajustadas adecuadamente y los equipos aguas abajo estén listos para recibir el fluido. Durante el período de estabilización del fluido, aplique la contra-presión requerida para garantizar que la bomba siempre esté operando en su rango.

5.4.4 PRECAUCIONES DURANTE LA OPERACIÓN

Para evitar el recalentamiento, desgaste o fallas prematuras en la bomba nunca la opere bajo las siguientes condiciones:

- ## 5.5 OPERACIÓN CAMARA DE EMPUJE HTC

Figura 24. Plano sistema de lubricación de Cámara de empuje

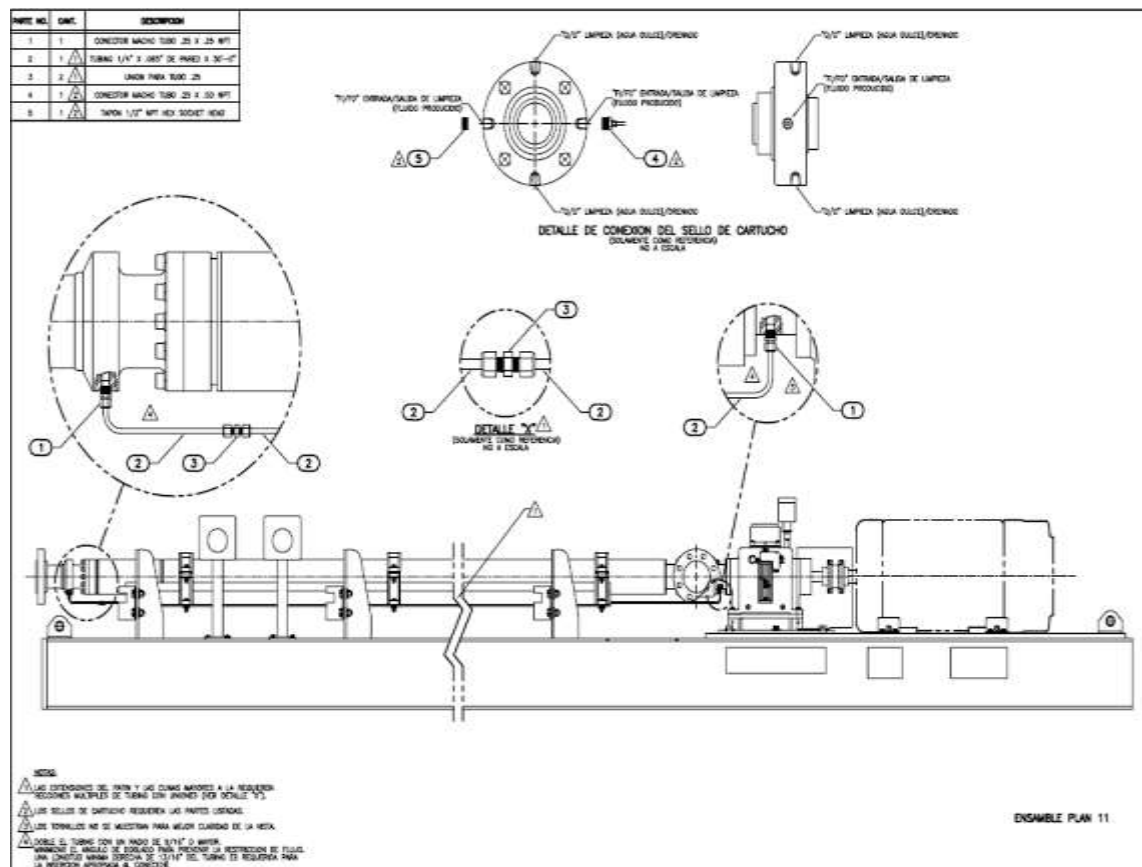


5.6 OPERACION ACOPLE DEL MOTOR

Asegúrese de tener la guarda protectora instalada antes de arrancar el equipo.

El acople estándar en una malla de acero flexible diseñada para soportar la potencia y velocidad del motor. El acople debe ser engrasado siguiendo las instrucciones del fabricante y mantenimiento preventivo

Figura 25. Plan de sellado HPump



Fuente: HPump Horizontal Surface Pumping System Centriflitt

5.7 OPERACIÓN MOTOR ELECTRICO

El motor normalmente es de 2 polos 3600 RPM con rodamientos de bola o manguitos en cada punta del eje. No debe ser operado por encima de la velocidad recomendada por el fabricante. Siga las instrucciones de lubricación mostradas en la placa. Amperaje, y factor de servicio.

5.8 OPERACIÓN MOTOR DE COMBUSTIÓN

La operación de estos motores debe ser estrictamente bajo las indicaciones del fabricante.

5.9 OPERACIÓN CAJA INCREMENTADORA DE VELOCIDAD

Normalmente estos motores trabajan a una baja velocidad que no es recomendable para la eficiente operación de las bombas, por lo tanto es necesario utilizar una caja de engranajes que incrementa la velocidad. Estas cajas normalmente necesitan sistemas de refrigeración del lubricante.

5.10 OPERACIÓN PANEL DE CONTROL DEL MOTOR

Si el motor que va a utilizar está provisto de un panel de control, toda manipulación debe estar de acuerdo a las instrucciones provistas en el manual del fabricante.

5.11 CHEQUEO DE OPERACIÓN

Todos los manómetros e instrumentos deben indicar condiciones normales y seguras de operación, la velocidad de la bomba debe ser verificada. Si alguna condición está fuera de los rangos normales de operación el sistema debe ser apagado.

5.12 PROCEDIMIENTOS DE APAGADO

Se recomienda seguir la siguiente secuencia de pasos cuando se vaya a apagar la unidad:

- Ajuste la válvula de la descarga a flujo mínimo
- Apague el motor desde el panel de control.
- Cierre la válvula de la descarga por completo.
- Inmediatamente de que el eje de la bomba pare de rotar cierre la válvula de la descarga.

5.13 REPUESTOS PARA SISTEMAS HORIZONTALES

La siguiente lista indica los repuestos que se recomienda tener en el almacén, esta lista es por unidad instalada.

Figura 26. Listado de repuestos básico

COMPONENTE	PERIODO DE TIEMPO			METODO DE ALMACENAMIENTO
	Arranque	0-2 Años	2+ Años	
Grasa del acople de malla	X	X	X	En empaque original
Acople de malla		X	X	Lejos de contaminantes
Empaque del acople		X	X	Lejos de contaminantes
Aceite para HTC	X	X	X	Depósito Cerrado
Respirador HTC		X	X	En empaque original en sitio seco
Filtro del sistema de lubricación de la HTC		X	X	En empaque original lejos de posibles contaminantes
Sistema de lubricación de la HTC			X	En empaque original lejos de fuentes de vibración
HTC			X	Tapada, llena de aceite lejos de Fuentes de vibración
Sellos de cartucho		X	X	En empaque del fabricante (Cerrados)
O-Rings de admisión		X	X	En empaque original lejos de posibles contaminantes
O-Rings de descarga	X	X	X	
O-Rings de HTC		X	X	
Bomba(s)			X	Tapada, llena de fluido preservativo adecuado lejos de Fuentes de vibración
Sistema completo (HPump)			X	Lejos de Fuentes de vibración y en sitio cerrado

Fuente: HPump Horizontal Surface Pumping System Centrilift

6. PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN CONFIABILIDAD (RCM)

En este capítulo se plantean las principales características del mantenimiento basado en confiabilidad RCM, de sus siglas en inglés, (Reliability Based Maintenance)

6.1 DEFINICION

Es una técnica de mantenimiento que tiene como objetivo analizar los fallos potenciales de un equipo, aumentar la confiabilidad y disponibilidad, disminuir los tiempo de parada y reducir los costos de mantenimiento.

El mantenimiento centrado en Confiabilidad (MCC), o Reliability-centred Maintenance (RCM), ha sido desarrollado para la industria de la aviación civil hace más de 30 años. El proceso permite determinar cuáles son las tareas de mantenimiento adecuadas para cualquier activo físico. El RCM ha sido utilizado en miles de empresas de todo el mundo: desde grandes empresas petroquímicas hasta las principales fuerzas armadas del mundo utilizan RCM para determinar las tareas de mantenimiento de sus equipos, incluyendo la gran minería, generación eléctrica, petróleo y derivados, metal-mecánica, etc.

El modelo RCM plantea, 7 preguntas básicas a saber:

1. ¿Cuáles son las funciones deseadas para el equipo que se está analizando?
2. ¿Cuáles son los estados de falla (fallas funcionales) asociados con estas funciones?
3. ¿Cuáles son las posibles causas de cada uno de estos estados de falla?
4. ¿Cuáles son los efectos de cada una de estas fallas?
5. ¿Cuál es la consecuencia de cada falla?

6. ¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir la falla?

7. ¿Qué hacer si no puede encontrarse una tarea predictiva o preventiva adecuada? Después de tener en suficiente claridad sobre las respuestas dadas a las 7 preguntas anteriores, es necesario adelantar tareas de mantenimiento preventivo para evitar los diferentes fallos potenciales que se pueden presentar en los equipos, llevando a cabo las siguientes acciones:

- Tareas de mantenimiento programado.
- Atenuación de los efectos de los diferentes tipos de fallos.
- Optimización de las existencias de repuestos.
- Adecuación de las instrucciones de mantenimiento.
- Revisión de las instrucciones de operación de los equipos y su adecuación hacia la fácil interpretación y aplicación.
- Realización de un formato de análisis de modos y efectos de falla (AMEF) que sirva como referencia para las labores de mantenimiento preventivo, correctivo y proactivo o predictivo.

6.2 EL CONTEXTO OPERACIONAL

Antes de comenzar a redactar las funciones deseadas para el activo que se está analizando (primera pregunta del RCM), se debe tener un claro entendimiento del contexto en el que funciona el equipo. Por ejemplo, dos activos idénticos operando en distintas plantas, pueden resultar en planes de mantenimiento totalmente distintos si sus contextos de operación son diferentes. Un caso típico es el de un sistema de reserva, que suele requerir tareas de mantenimiento muy distintas a las de un sistema principal, aun cuando ambos sistemas sean físicamente idénticos.

Entonces, antes de comenzar el análisis se debe redactar el contexto operacional, breve descripción (2 o 3 carillas) donde se debe indicar: régimen de operación del equipo, disponibilidad de mano de obra y repuestos, consecuencias de indisponibilidad del equipo (producción perdida ó reducida, recuperación de producción en horas extra, tercerización), objetivos de ó calidad, seguridad y medio ambiente, etc.

6.3 FUNCIONES

El análisis de RCM comienza con la redacción de las funciones deseadas. Por ejemplo, la función de una bomba puede definirse como “Bombear no menos de 500 litros/minuto de agua”. Sin embargo, la bomba puede tener otras funciones asociadas, como por ejemplo “Contener al agua (evitar pérdidas)”. En un análisis de RCM, todas las funciones deseadas deben ser listadas.

6.4 FALLAS FUNCIONALES O ESTADOS DE FALLA

Las fallas funcionales o estados de falla identifican todos los estados indeseables del sistema. Por ejemplo, para una bomba dos estados de falla podrían ser “Incapaz de bombear agua”, “Bombea menos de 500 litros/minuto”, “No es capaz de contener el agua”. Notar que los estados de falla están directamente relacionados con las funciones deseadas. Una vez identificadas todas las funciones deseadas de un activo, identificar las fallas funcionales es generalmente muy sencillo.

6.5 MODOS DE FALLA

Un modo de falla es una posible causa por la cual un equipo puede llegar a un estado de falla. Por ejemplo, “impulsor desgastado” es un modo de falla que hace que una bomba llegue al estado de falla identificado por la falla funcional “bombea menos de lo requerido”. Cada falla funcional suele tener más de un modo de falla.

Todos los modos de falla asociados a cada falla funcional deben ser identificados durante el análisis de RCM. Al identificar los modos de falla de un equipo o sistema, es importante listar la “causa raíz” de la falla. Por ejemplo, si se están analizando los modos de falla de los rodamientos de una bomba, es incorrecto listar el modo de falla “falla rodamiento”. La razón es que el modo de falla listado no da una idea precisa de porque ocurre la falla. Es por falta de lubricación”? Es por “desgaste y uso normal”? Es por “instalación inadecuada”? Notar que este desglose en las causas que subyacen a la falla sí da una idea precisa de porque ocurre la falla, y por consiguiente que podría hacerse para manejarla adecuadamente (lubricación, análisis de vibraciones, etc.).

6.6 LOS EFECTOS DE FALLA

Para cada modo de falla deben indicarse los efectos de falla asociados. El “efecto de falla” es un breve descripción de “que pasa cuando la falla ocurre”. Por ejemplo, el efecto de falla asociado con el modo de falla “impulsor desgastado” podría ser el siguiente: “a medida que el impulsor se desgasta, baja el nivel del tanque, hasta que suena la alarma de bajo nivel en la sala de control. El tiempo necesario para detectar y reparar la falla (cambiar impulsor) suele ser de 6 horas. Dado que el tanque se vacía luego de 4 horas, el proceso aguas abajo debe detenerse durante dos horas. No es posible recuperar la producción perdida, por lo que estas dos horas de parada representan una pérdida de ventas”. Los efectos de falla deben indicar claramente cuál es la importancia que tendría la falla en caso de producirse.

6.7 CATEGORÍA DE CONSECUENCIAS

La falla de un equipo puede afectar a sus usuarios de distintas formas:

- Poniendo en riesgo la seguridad de las personas (“consecuencias de seguridad”)
- Afectando al medio ambiente (“consecuencias de medio ambiente”)

- Incrementando los costos o reduciendo el beneficio económico de la empresa ("consecuencias operacionales")
- Ninguna de las anteriores ("consecuencias no operacionales") Además, existe una quinta categoría de consecuencias, para aquellas fallas que no tienen ningún impacto cuando ocurren ´ salvo que posteriormente ocurra alguna otra falla. Por ejemplo, la falla del neumático de auxilio no tiene ninguna consecuencia adversa salvo que ocurra una falla posterior (pinchadura de un neumático de servicio) que haga que sea necesario cambiar el neumático. Estas fallas corresponden a la categoría de fallas ocultas. Cada modo de falla identificado en el análisis de RCM debe ser clasificado en una ´ de estas categorías. El orden en el que se evalúan las consecuencias es el siguiente: seguridad, medio ambiente, operacionales, y no operacionales, previa separación entre fallas evidentes y ocultas.

El análisis RCM bifurca en esta etapa: el tratamiento que se le va a dar a cada modo de falla va a depender de la categoría de consecuencias en la que se haya clasificado, lo que es bastante razonable: no sería lógico tratar de la misma forma a fallas que pueden afectar la seguridad que aquellas que tienen consecuencias económicas. El criterio a seguir para evaluar tareas de mantenimiento es distinto si las ´ consecuencias de falla son distintas.

6.8 DIFERENCIA ENTRE EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE FALLA

El efecto de falla es una descripción de qué pasa cuando la falla ocurre, mientras que la consecuencia de falla clasifica este efecto en una de 5 categorías, según el impacto que estas fallas tienen.

6.9 DIFERENCIA ENTRE FALLA FUNCIONAL Y MODOS DE FALLA

La falla funcional identifica un estado de falla: incapaz de bombear, incapaz de cortar la pieza, incapaz de sostener el peso de la estructura... No dice nada acerca de las causas por las cuales el equipo llega a ese estado. Eso es justamente lo que

se busca con los modos de falla: identificar las causas de esos estados de fallas (eje cortado por fatiga, filtro tapado por suciedad, etc.).

6.10 FALLAS OCULTAS

Los equipos suelen tener dispositivos de protección, es decir, dispositivos cuya función principal es la de reducir las consecuencias de otras fallas (fusibles, detectores de humo, dispositivos de detención por sobre velocidad / temperatura / presión, etc.). Muchos de estos dispositivos tienen la particularidad de que pueden estar en estado de falla durante mucho tiempo sin que nadie ni nada ponga en evidencia que la falla ha ocurrido. (Por ejemplo, un extintor contra incendios puede ser hoy incapaz de apagar un incendio, y esto puede pasar totalmente desapercibido (si no ocurre el incendio). Una válvula de alivio de presión en una caldera puede fallar de tal forma que no es capaz de aliviar la presión si esta excede la presión máxima, y esto puede pasar totalmente desapercibido (si no ocurre la falla que hace que la presión supere la presión máxima). Si no se hace ninguna tarea de mantenimiento para anticiparse a la falla o para ver si estos dispositivos son capaces de brindar la protección requerida, entonces puede ser que la falla solo se vuelva evidente cuando ocurra aquella otra falla cuyas consecuencias el dispositivo de protección esta para aliviar. (Por ejemplo, es posible que nos demos cuenta que no funciona el extintor recién cuando ocurra un incendio, pero entonces ya es tarde: se produjo el incendio fuera de control. Es posible que nos demos cuenta que no funciona la válvula de seguridad recién cuando se eleve la presión y esta no actué, pero también ya es tarde: se produjo la explosión de la caldera.) Este tipo de fallas se denominan fallas ocultas, dado que requieren de otra falla para volverse evidentes.

6.11 DISTINTOS TIPOS DE MANTENIMIENTO

Tradicionalmente, se consideraba que existían tres tipos de mantenimiento distintos: predictivo, preventivo, y correctivo. Sin embargo, existen cuatro tipos de mantenimiento distintos:

- Mantenimiento predictivo, también llamado mantenimiento a condición.
- Mantenimiento preventivo, que puede ser de dos tipos: sustitución o reacondicionamiento cíclico.
- Mantenimiento correctivo, también llamado trabajo a la falla.
- Mantenimiento detectivo o “búsqueda de fallas”.

6.12 EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO O A CONDICION

El mantenimiento predictivo o mantenimiento a condición consiste en la búsqueda de indicios o síntomas que permitan identificar una falla antes de que ocurra. Por ejemplo, la inspección visual del grado de desgaste de un neumático es una tarea de mantenimiento predictivo, dado que permite identificar el proceso de falla antes de que la falla funcional ocurra. Estas tareas incluyen: inspecciones (ej. inspección visual del grado de desgaste), monitorios (ej. vibraciones, ultrasonido), chequeos (ej. nivel de aceite). Tienen en común que la decisión de realizar o no una acción correctiva depende de la condición medida. Por ejemplo, a partir de la medición de vibraciones de un equipo puede decidirse cambiarlo o no. Para que pueda evaluarse la conveniencia de estas tareas, debe necesariamente existir una clara condición de falla potencial. Es decir, debe haber síntomas claros de que la falla está en el proceso de ocurrir.

6.13 EL MANTENIMIENTO PREVENTIVO (SUSTITUCIÓN O REACONDICIONAMIENTO CÍCLICO)

El mantenimiento preventivo se refiere a aquellas tareas de sustitución o re trabajo hechas a intervalos fijos independientemente del estado del elemento o componente. Estas tareas solo son válidas si existe un patrón de desgaste: es decir, si la probabilidad de falla aumenta rápidamente después de superada la vida útil del elemento. Debe tenerse mucho cuidado, al momento seleccionar una tarea preventiva (o cualquier otra tarea de mantenimiento, de hecho), en no confundir una

tarea que se puede hacer, con 5 una tarea que conviene hacer. Por ejemplo, al evaluar el plan de mantenimiento a realizar sobre el impulsor de una bomba, podríamos decidir realizar una tarea preventiva (sustitución cíclica del impulsor), tarea que en general se puede hacer dado que la falla generalmente responde a un patrón de desgaste (patrón B de los 6 patrones de falla del RCM). Sin embargo, en ciertos casos podría convenir realizar alguna tarea predictiva (tarea a condición), que en muchos casos son menos invasivas y menos costosas.

6.14 EL MANTENIMIENTO CORRECTIVO O TRABAJO A LA ROTURA

Si se decide que no se hará ninguna tarea proactiva (predictiva o preventiva) para manejar una falla, sino que se reparara la misma una vez que ocurra, entonces el mantenimiento elegido es un mantenimiento correctivo. ¿Cuándo conviene este tipo de mantenimiento? Cuando el costo de la falla (directos indirectos) es menor que el costo de la prevención, o cuando no puede hacerse ninguna tarea proactiva y no se justifica realizar un rediseño del equipo. Esta opción solo es válida en caso que la falla no tenga consecuencias sobre la seguridad o el medio ambiente. Caso contrario, es obligatorio hacer algo para reducir o eliminar las consecuencias de la falla.

6.15 EL MANTENIMIENTO DETECTIVO O DE BÚSQUEDA DE FALLAS

El mantenimiento detectivo o de búsqueda de fallas consiste en la prueba de dispositivos de protección bajo condiciones controladas, para asegurarse que estos dispositivos serán capaces de brindar la protección requerida cuando sean necesarios. En el mantenimiento detectivo no se está reparando un elemento que fallo (mantenimiento correctivo), no se está cambiando ni reacondicionando un elemento antes de su vida útil (mantenimiento preventivo), ni se están buscando síntomas de que una falla esta en el proceso de ocurrir (mantenimiento predictivo).

Por lo tanto, el mantenimiento detectivo es un cuarto tipo de mantenimiento. A este mantenimiento también se lo llama búsqueda de fallas o prueba funcional, y al

intervalo cada el cual se realiza esta tarea se lo llama intervalo de búsqueda de fallas, o FFI, por sus siglas en inglés (Failure-Finding Interval). Por ejemplo, arrojar humo a un detector contra incendios es una tarea de mantenimiento detectivo.

6.16 ¿CÓMO SELECCIONAR EL TIPO DE MANTENIMIENTO ADECUADO?

En el RCM, la selección de políticas de mantenimiento está gobernada por la categoría de consecuencias a la que pertenece la falla.

- Para fallas con consecuencias ocultas, la tarea óptima es aquella que consigue la disponibilidad requerida del dispositivo de protección.
- Para fallas con consecuencias de seguridad o medio ambiente, la tarea óptima es aquella que consigue reducir la probabilidad de la falla hasta un nivel tolerable.
- Para fallas con consecuencias económicas (operacionales y no operacionales), la tarea óptima es aquella que minimiza los costos totales para la organización.

Aun hoy, mucha gente piensa en el mantenimiento preventivo como la principal opción al mantenimiento correctivo. Sin embargo, el RCM muestra que en el promedio de las industrias el mantenimiento preventivo es la estrategia adecuada para menos del 5% de las fallas! Qué hacer con el otro 95 %? En promedio, al realizar un análisis RCM se ve que las políticas de mantenimiento se distribuyen de la siguiente forma: 30% de las fallas manejadas por mantenimiento predictivo (a condición), otro 30% por mantenimiento detectivo, alrededor de 5% mediante mantenimiento preventivo, 5% de rediseños, y aproximadamente 30% mantenimiento correctivo. Esto muestra efectivamente que una de las máximas del TPM (Total Productive Maintenance) que dice que "todas las fallas son malas y todas deben ser prevenidas", es de hecho equivocada: solo deben ser prevenidas aquellas que convenga prevenir, en base a un cuidadoso análisis costo-beneficio.

6.17 FRECUENCIA DE TAREAS A CONDICIÓN (MANTENIMIENTO PREDICTIVO)

Para que una tarea a condición sea posible, debe existir alguna condición física identificable que anticipe la ocurrencia de la falla. Por ejemplo, una inspección visual de un elemento solo tiene sentido si existe algún síntoma de falla que pueda detectarse visualmente. Además de existir un claro síntoma de falla, el tiempo desde el síntoma hasta la falla funcional debe ser suficientemente largo para ser de utilidad. La frecuencia de una tarea a condición se determina entonces en función del tiempo que pasa entre el síntoma y la falla. Por ejemplo, si se está evaluando la conveniencia de chequear ruido en los rodamientos de un motor, entonces la frecuencia va a estar determinada por el tiempo entre que el ruido es detectable, y que se produce la falla del rodamiento. Si este tiempo es de, por ejemplo, dos semanas, entonces la tarea debe hacerse a una frecuencia menor, para asegurarse de esta forma que la falla no ocurra en el tiempo entre chequeos sucesivos. El mismo razonamiento debe seguirse para cualquier tarea predictiva.

6.18 FRECUENCIA DE TAREAS DE SUSTITUCIÓN CÍCLICA (MANTENIMIENTO PREVENTIVO)

Una tarea de sustitución cíclica solo es válida si existe un patrón de desgaste. Es decir, si existe “una edad en la que aumenta rápidamente la probabilidad condicional de la falla”. La frecuencia de la tarea de sustitución depende de esta edad, llamada vida útil. Por ejemplo, si la vida útil de un neumático es de 40.000 km, entonces la tarea de sustitución cíclica (cambio preventivo del neumático) debería realizarse cada menos de 40.000 km, para de esta forma evitar entrar en la zona de alta probabilidad de falla.

6.19 FRECUENCIA DE TAREAS DETECTIVAS (BÚSQUEDA DE FALLAS)

El intervalo con el que se realiza la tarea de búsqueda de fallas (mantenimiento detectivo) se denomina FFI (Failure Finding Interval). Existe una relación entre este intervalo y la disponibilidad del dispositivo de protección. Pueden utilizarse

herramientas matemáticas para calcular esta relación, y fijar el FFI que logre la disponibilidad objetivo.

6.20 BENEFICIOS DEL RCM

La implementación del RCM debe llevar a equipos más seguros y confiables, reducciones de costos (directos e indirectos), mejora en la calidad del producto, y mayor cumplimiento de las normas de seguridad y medio ambiente. El RCM también está asociado a beneficios humanos, como mejora en la relación entre distintas áreas de la empresa, fundamentalmente un mejor entendimiento entre mantenimiento y operaciones.

7. PLAN DE MEJORAMIENTO BASADO EN RCM PARA EL MANTENIMIENTO DE LAS BOMBAS HORIZONTALES DE INYECCION DE AGUA

El plan de mantenimiento basado en RCM de bombas horizontales multietapa, se ha organizado llevando el siguiente orden metodológico.

VER ANEXO A

8. CONCLUSIONES

- Los contextos operativos de todos los sistemas de Reinyección de agua del Bloque Cara cara – campo Jaguar son iguales por lo que se realiza un solo AMEF de proceso para todas las unidades HPS que son también iguales y con las mismas características, componentes y funciones.
- Los formatos establecidos pueden tomarse como referencia para realizar los análisis de otros sistemas, pues están basados en la norma internacional ISO 14224 – 2006 (Recolección e intercambio de información de confiabilidad y mantenimiento para equipos relacionados a la industria del petróleo y gas natural).
- La estrategia de RCM es un método práctico - con resultados a mediano y largo plazo para la implementación de un plan de mantenimiento en el cual se pueden optimizar los costos operativos, lograr altos estándares de disponibilidad y alcanzar los objetivos de clase mundial en aspectos de seguridad y medio ambiente.
- La experiencia adquirida dentro de la realización de este proyecto permitió afianzar conocimientos adquiridos en la universidad y aplicarlos de manera correcta bajo la supervisión de los profesionales de mantenimiento de masa-Stork.
- Durante la realización de las labores diarias de mantenimiento hubo participación activa del personal operativo, administrativo, ingeniería y el estudiante para la correcta aplicación y evaluación del plan de mantenimiento con el fin de realizar un mejoramiento continuo a lo largo de su ejecución.
- El plan de mejoramiento basado en RCM diseñado, tendrá una aplicación periódica y sistemática, iniciando por la inclusión al sistema administrativo SAP Módulo PM y su ejecución se irá dando a medida que se concientice al personal operativo de su importancia para mantener la disponibilidad de los sistemas de bombeo horizontal.

9. RECOMENDACIONES

- Crear el grupo de análisis multidisciplinario los cuales deberán hacer revisiones periódicas a este tipo de documentación y así establecer criterios de mejora continua.
- Capacitar al personal operativo y administrativo en nuevas técnicas de mantenimiento de última generación para mantener el sistema a la vanguardia.
- Disponer de los recursos económicos necesarios para mantener el stock mínimo de repuestos para los sistemas de bombeo horizontal (HPS)
- Disponer del personal capacitado y actualizado en las últimas técnicas de mejoramiento para sistemas de inyección de agua industrial.
- Generar conciencia en todos los entes de masa stork que la mantenibilidad y la disponibilidad son términos que van de la mano con un correcto funcionamiento de los equipos para evitar paradas de mantenimiento.
- Crear en el personal el sentimiento de pertenencia por la empresa masa stork para contribuir a una buena actitud y disposición laboral en busca de las mejores prácticas de mantenimiento.
- Planificar el tratamiento químico con agentes biodegradables para garantizar limpieza del sistema de acuerdo a plan de mantenimiento propuesto.

10. BIBLIOGRAFIA

GARCIA PALENCIA, Oliverio. Administración del mantenimiento industrial. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 1992.

HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto. Metodología de la investigación. McGRAW-HILL / interamericana editores, quinta edición.

MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en confiabilidad. Segunda Edición North Carolina. Aladon LLC 2004 433 pg

NORMA ISO 14224. Petroleum and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. 2004

NORMA TECNICA COLOMBIANA NTC 1486. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación Julio 2008.

PAURO, Ricardo. Mantenimiento centrado en confiabilidad ¿Qué pensamos? Disponible en Internet. www.capacitacionempresarial.la

CATALOGO BOMBAS HORIZONTALES CENTRILIFT, Bakerhughes.com, <http://assets.cmp.bh.mxmcloud.com/system/ca/5b0b70e01b11e39266b1072844e32f/HPump.Kit.pdf>. (EN LINEA), Consultado: 28/08/2015

ORGANIZACIÓN ITALIANA DE NORMALIZACION (UNI), NORMA UNI 13306. Terminología del Mantenimiento, 2003.

STANDARD AMERICAN ENGINEERING (SAE), Normas de aplicación en las industrias en todas las ramas ingenieriles, de acuerdo a patrones preestablecidos para el buen funcionamiento de los procesos. NORMA SAE JA 1012: A Guide to a Reliability Centered Maintenance (RCM) Standard. 2002

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC), NORMA IEC 60300-3-11:2009 Gestión de la confiabilidad. Parte 3-11: Guía de aplicación. Mantenimiento centrado en la fiabilidad. 2009.